Optimasi Waktu dan Kapasitas Produksi Desain Pion Menggunakan Mesin CNC Bubut Melalui Simulasi Autodesk Fusion

Bellia Ananda Faisal[1], Desmarita Leni[2], Muchlisinalahuddin[3]
Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat
e-mail: belliaanandafaisal@gmail.com[1], desmaritaleni@gmail.com[2], muchlisinalahuddin.umsumbar@gmail.com[3],

ABSTRACT

Modern manufacturing industries face challenges in improving efficiency and product quality. In this study, a pawn was designed using Autodesk Fusion 360, followed by a turning process simulation to optimize machining parameters such as cutting speed, feed rate, and depth of cut. The simulation was conducted to identify potential issues such as tool wear and dimensional inaccuracies before the actual production process. The results showed that implementing simulations effectively minimized production time, improved dimensional accuracy, and reduced tool wear. The applied optimization parameters successfully shortened the production cycle and produced defect-free products that met the required specifications. This study concludes that simulation and optimization in CNC turning machines not only enhance production efficiency and capacity but also ensure consistent product quality, making them highly relevant for modern manufacturing industries.

Kata kunci: *Simulation, Optimization, CNC Turning*

ABSTRAK

Industri manufaktur modern saat ini menghadapi tantangan dalam meningkatkan efisiensi dan kualitas produk. Dalam penelitian ini, pion dirancang menggunakan aplikasi Autodesk Fusion 360 yang diikuti simulasi proses bubut untuk mengoptimalkan parameter pemesinan seperti kecepatan potong, laju pemakanan, dan kedalaman pemotongan. Simulasi dilakukan untuk mengidentifikasi potensi masalah seperti keausan alat potong dan ketidaksesuaian dimensi sebelum proses produksi aktual. Hasil menunjukkan bahwa penerapan simulasi mampu meminimalkan waktu produksi, meningkatkan akurasi dimensi, dan mengurangi keausan alat. Parameter optimasi yang diterapkan berhasil memperpendek siklus produksi dan menghasilkan produk dengan spesifikasi yang sesuai tanpa cacat. Penelitian ini menyimpulkan bahwa simulasi dan optimasi pada mesin CNC bubut tidak hanya meningkatkan efisiensi dan kapasitas produksi tetapi juga memastikan kualitas produk yang konsisten, sehingga relevan untuk diterapkan di industri manufaktur modern.

Kata kunci: Simulasi, Optimasi, CNC Bubut

PENDAHULUAN

Industri manufaktur modern sangat bergantung pada teknologi yang dapat meningkatkan efisiensi, akurasi, dan fleksibilitas dalam produksi [1]. Salah satu teknologi yang telah menjadi standar dalam industri adalah mesin CNC (*Computer Numerical Control*). Mesin CNC memungkinkan otomatisasi dan presisi tinggi dalam pembuatan berbagai komponen, mulai dari suku cadang otomotif, komponen elektronik, hingga alat medis [2]. Kemampuan untuk memproduksi berbagai bentuk dan ukuran secara konsisten membuat CNC berperan penting dalam proses produksi di berbagai industri. Khususnya proses CNC bubut yang sangat efektif dalam memproduksi komponen-komponen yang membutuhkan akurasi tinggi dan simetri, seperti poros, roda gigi, dan komponen silindris lainnya [3]. Proses ini melibatkan pemotongan bahan dengan alat yang dikendalikan oleh komputer untuk menciptakan bentuk yang diinginkan dengan toleransi yang sangat ketat. Mesin CNC bubut mampu bekerja dengan berbagai jenis material, termasuk logam, plastik, dan komposit, sehingga membuatnya sangat serbaguna dalam aplikasi industri [4]. CNC memiliki banyak keunggulan, namun dalam pengaplikasiannya proses produksi sering menghadapi tantangan yang dapat menurunkan efisiensi hasil produksi. Salah satu tantangan utamanya adalah mengoptimalkan proses produksi agar sesuai dengan desain yang diinginkan tanpa mengurangi kualitas atau meningkatkan biaya produksi. Maka dari itu simulasi berperan penting dalam mengatasi tantangan tersebut.

Manfaat simulasi dalam penggunaan mesin CNC yaitu dapat membantu perusahaan untuk memprediksi hasil akhir dari proses produksi sebelum proses tersebut dilakukan secara nyata [5]. Simulasi ini membantu mengoptimalkan parameter pemesinan, seperti kecepatan potong, laju pemakanan, dan kedalaman potong yang sangat mempengaruhi kualitas permukaan produk akhir [6]. Simulasi juga membantu dalam

mengidentifikasi potensi masalah, seperti keausan alat potong, kekasaraan permukaan atau deformasi material selama proses pemotongan [7]. Contoh simulasi desain dapat diterapkan pada pembuatan pion. Dalam proses pembuatan pion membutuhkan tingkat presisi yang tinggi. Melalui penggunaan simulasi, desain pion dapat dioptimalkan agar setiap komponen yang diproduksi sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan dan bebas dari cacat. Optimasi juga mencakup penyesuaian dalam parameter pemotongan atau desain alat potong yang digunakan, sehingga dapat meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi biaya [8].

Beberapa masalah umum yang sering terjadi dalam pembuatan pion adalah ketidakakuratan dalam dimensi akhir, keausan alat yang cepat, dan waktu siklus produksi yang panjang. Ketidakakuratan dimensi dapat menyebabkan pion tidak berfungsi dengan baik dalam penggunaannya, serta keausan dapat meningkatkan biaya pemeliharaan dan *downtime* pada mesin. Masalah ini sering kali disebabkan oleh kurangnya optimasi dalam proses pemotongan atau desain alat yang tidak sesuai dengan karakteristik material. Melalui penerapan simulasi dan optimasi masalah-masalah tersebut dapat diidentifikasi dan diperbaiki sebelum dimulainya proses produksi. Simulasi dapat membantu desainer dan teknisi dalam menguji hasil produksi dan menemukan konfigurasi yang paling efisien dan efektif [9]. Proses optimasi juga dapat dilakukan untuk mengurangi keausan alat, memperpendek waktu siklus, dan memastikan bahwa produk akhir memenuhi semua spesifikasi yang ditetapkan [10]. Penelitian dengan judul "Optimasi Waktu dan Kapasitas Produksi Desain Pion Menggunakan Mesin CNC Bubut Melalui Simulasi Autodesk Fusion" sangat relevan dengan kebutuhan industri manufaktur saat ini yang berfokus pada peningkatan efisiensi dan kualitas produksi. Penelitian ini memberikan metode praktis untuk mengoptimalkan proses produksi menggunakan teknologi simulasi yang dapat meningkatkan daya saing industri di pasar global.

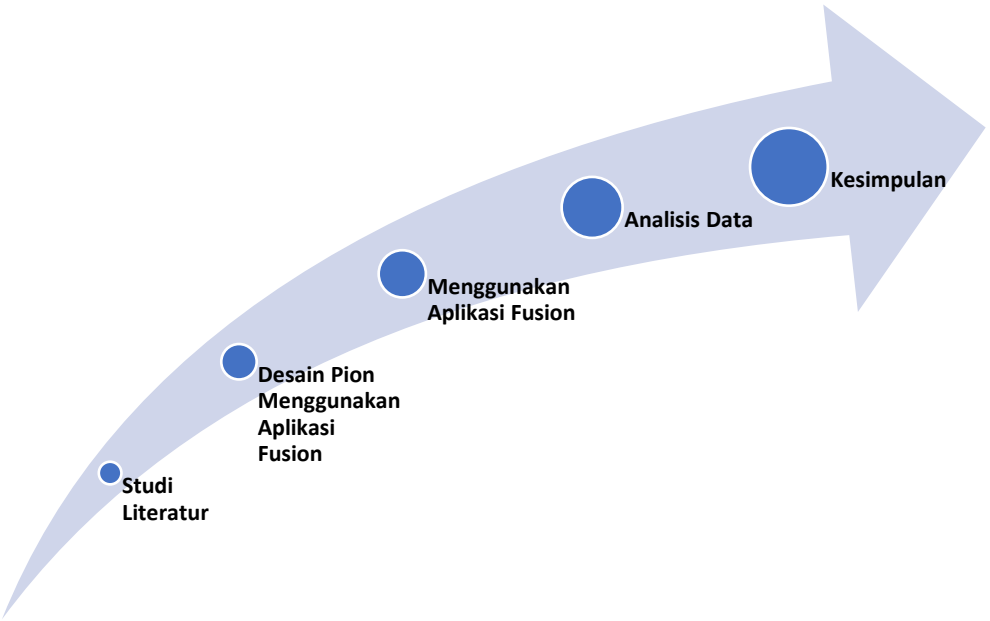
TINJAUAN PUSTAKA

CNC Bubut

Mesin CNC (*Computer Numerical Control*) bubut merupakan salah satu alat utama dalam industri manufaktur modern. Teknologi ini menggabungkan sistem kontrol numerik berbasis komputer dengan mekanisme pemesinan untuk menghasilkan produk berbentuk silinder dengan tingkat presisi dan efisiensi yang tinggi [11]. Secara teknis, mesin CNC bubut terdiri atas komponen utama seperti *spindle*, *chuck*, *carriage*, *bed*, dan sistem kontrol berbasis komputer [12]. Sistem kontrol berfungsi sebagai pengatur utama gerakan mesin, meliputi kecepatan putaran spindle dan jalur gerak pahat yang dibuatkan dalam format numerik (*G-code*). *G-code* ini dihasilkan melalui perangkat lunak CAD (*Computer Aided Design*) dan CAM (*Computer Aided Manufacturing*) yang mengintegrasikan desain produk dengan proses pemesinan secara efisien [13]. Keunggulan mesin CNC bubut dibandingkan dengan mesin bubut konvensional adalah kemampuannya untuk menghasilkan produk dengan toleransi yang sangat kecil, selain itu mesin ini mampu mendukung produksi massal dengan tingkat konsistensi yang tinggi [14].

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan fokus pada simulasi dan optimasi proses produksi pada mesin CNC bubut. Metode yang digunakan terdiri dari beberapa tahap yang terstruktur yang dapat dilihat pada gambar 1 diagram alir penelitian.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

1. Studi Literatur

   Studi literatur adalah tahap awal yang bertujuan untuk memahami dasar teori dan perkembangan terkini terkait dengan teknologi CNC bubut, simulasi produksi, dan optimasi proses produksi. Pada tahap ini, peneliti mengumpulkan dan menganalisis berbagai sumber literatur ilmiah seperti jurnal, buku, dan artikel teknis yang relevan. Studi ini penting untuk membangun landasan teoritis yang kuat serta untuk mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan yang bisa dijadikan dasar penelitian.

2. Desain Pion Menggunakan Aplikasi Fusion

   Tahap desain pada penelitian ini menggunakan aplikasi fusion, ada beberapa tahapan yang dilakukan dalam rancangan ini yaitu sebagai berikut:

   a. Perancangan Pion
      Tahap pertama melibatkan perancangan model pion menggunakan aplikasi Fusion 360. Desain ini disesuaikan dengan spesifikasi teknis yang dibutuhkan untuk produksi pada mesin CNC bubut. Parameter desain termasuk tinggi pion, diameter dasar, diameter puncak, serta radius fillet.

   b. Simulasi Proses Bubut pada Aplikasi Fusion
      Simulasi proses bubut dilakukan di dalam aplikasi Fusion 360. Simulasi ini mencakup semua langkah pemesinan yang akan dilakukan oleh mesin CNC bubut, termasuk pemotongan kasar, pemotongan akhir, dan pemolesan.

   c. Analisis Hasil Simulasi

      a) Waktu Pengerjaan (tm)
         Waktu yang diperlukan untuk memproduksi pion dihitung menggunakan rumus dasar waktu pengerjaan yang mempertimbangkan kecepatan potong, *feed rate* (kecepatan makan), dan panjang pemotongan [15]. Waktu pengerjaan dapat dihitung menggunakan persamaan 1.

$$tm = \frac{L}{F} \ldots(1)$$

$$L = la \times l \quad ...(2)$$

Dimana:

tm : Waktu pemotongan (menit)
L : Panjang total pembubutan rata (mm)
F : Kecepatan pemakanan (mm/menit)
la : Jarak star pahat (mm)
l : Panjang pembubutan rata (mm)

b) Kecepatan Potong (Vc)
Kecepatan potong (Vc) adalah kemampuan alat potong menyayat benda kerja dengan aman yang menghasilkan total dalam satuan panjang/waktu (m/menit) [16]. Kecepatan potong dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.

$$Vc = \frac{\mu dn}{1000} \quad ...(3)$$

Dimana:
Vc : Kecepatan potong (m/menit)
d : Diameter benda kerja (mm)
n : Putaran benda (Rpm)
π : nilai konstanta (3,14)

c) Kecepatan Makan (F)
Kecepatan makan adalah kecepatan gerakan alat pemotong terhadap benda kerja. Besarnya kecepatan pemakanan (F) pada mesin bubut ditentukan oleh seberapa besar bergesernya pahat bubut (f) dalam satuan mm/putaran dikalikan seberapa besar putaran mesinnya (n) dalam satuan putaran [17]. Kecepatan makan dapat dihitung menggunakan persamaan 4.

$$F = f \times n \quad ...(4)$$

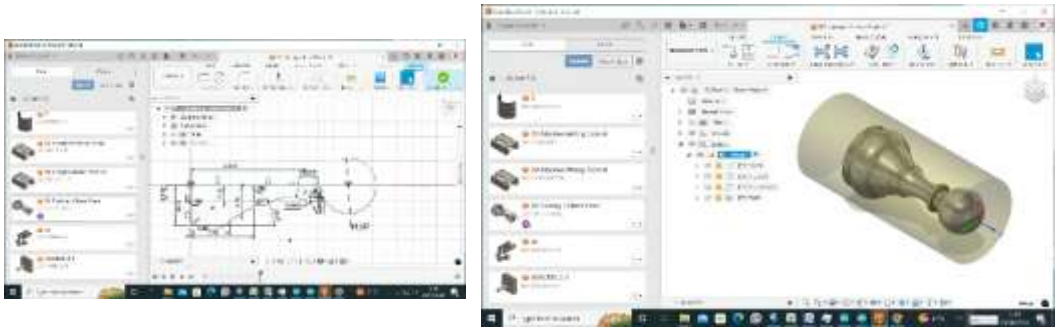
Dimana:
F : Kecepatan makan (mm/menit)
f : besar pemakanan atau bergesernya pahat (mm/putaran)
n : putaran mesin (Rpm)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan Desain Pion

Perancangan merupakan langkah awal dalam memahami prinsip desain dan manufaktur suatu komponen mekanik. Proses ini bertujuan untuk membuat model virtual yang menggambarkan bentuk geometris suatu produk secara akurat yang sesuai dengan spesifikasi desain [18]. Perancangan desain memiliki peran penting dalam memastikan bahwa produk yang dirancang tidak hanya memenuhi kebutuhan pengguna, tetapi juga dapat diproduksi secara efektif. Dalam dunia manufaktur modern, perancangan desain memanfaatkan teknologi komputer, seperti CAD (*Computer Aided Design*) yang dapat membuat model tiga dimensi dengan presisi tinggi. Teknologi ini mendukung visualisasi yang lebih jelas, mengidentifikasi potensi masalah sejak tahap awal, dan memfasilitasi modifikasi desain secara cepat dan efisien [19].

Pada perancangan desain pion ini penulis memanfaatkan fitur desain 3D pada aplikasi Autodesk Fusion 360. Dalam tahap ini, fitur *sketch* digunakan untuk membuat profil 2D pion yang menjadi dasar pengembangan model 3D. Profil ini dirancang berdasarkan spesifikasi teknis, seperti diameter, tinggi, dan radius yang ditentukan sesuai dengan kebutuhan desain, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.



(a) (b)

Gambar 2. a) Desain 2D, b) desain 3D.

Simulasi Proses Bubut Pada Aplikasi Fusion

Pada penelitian ini aluminium dipilih sebagai material benda kerja karena sifat mekaniknya yang unggul, seperti kekuatan tinggi, plastisitas ketangguhan, dan ketahanan korosi yang baik [20]. Aluminium juga memiliki densitas rendah yang mengurangi gaya potong selama proses pembubutan, sehingga meningkatkan efisiensi dan akurasi pemesinan [21]. Aluminium lebih mudah dipotong dibandingkan baja atau titanium dengan kecepatan pemesinan yang lebih tinggi dan menghasilkan permukaan yang lebih halus. Pada sisi lain, kompatibilitas aluminium dengan *tool library* pada perangkat lunak CAM seperti Autodesk Fusion 360 mempermudah pemilihan alat potong yang sesuai serta optimalisasi jalur pemotongan, sehingga proses simulasi dapat berjalan lebih akurat dan memastikan kualitas produk yang dihasilkan sesuai spesifikasi.

Simulasi proses bubut menggunakan aplikasi Autodesk Fusion 360 berfungsi untuk memastikan desain dapat diproduksi secara optimal menggunakan mesin CNC bubut. Melalui simulasi ini pengguna dapat memvisualisasikan jalur pemotongan pahat (toolpath), interaksi alat potong dengan material, dan hasil akhir produk sebelum pemesinan aktual dilakukan [22]. Hal ini membantu meminimalkan kesalahan desain dan parameter yang dapat mempengaruhi kualitas produk, sekaligus meningkatkan efisiensi dan akurasi proses produksi. Simulasi juga dapat mengidentifikasi potensi masalah teknis, seperti interferensi alat potong, kelebihan beban spindle, atau ketidaksesuaian toleransi dimensi, sehingga dapat menghindari risiko kerusakan mesin, pemborosan material, dan waktu produksi yang lebih lama [23]. Dalam industri manufaktur, simulasi berperan penting untuk mengoptimalkan efisiensi dan konsistensi produksi. Melalui data simulasi, operator dapat menentukan parameter pemesinan, seperti kecepatan potong, laju pemakanan, dan kedalaman pemotongan, sehingga dapat mencapai hasil maksimal dalam waktu yang singkat [24].

Proses simulasi bubut pada desain pion dilakukan menggunakan fitur CAM (*Computer Aided Manufacturing*) pada Autodesk Fusion 360 yang mempermudah visualisasi jalur alat potong dan optimasi proses pemotongan. Langkah pertama yang dilakukan yaitu setup pemotongan, fitur *turning setup* digunakan untuk mengatur material benda kerja, orientasi benda di mesin CNC, dan titik nol. Pemilihan alat potong dilakukan dari *tool library* berdasarkan jenis material benda kerja yang digunakan, seperti baja karbon atau aluminium, dan jenis pemotongan yang diinginkan (kasar atau halus). Jalur alat potong divisualisasikan menggunakan fitur *turning toolpath simulation* yang dapat memperlihatkan bagaimana alat potong potong berinteraksi pada benda kerja yang dapat dilihat pada gambar 3.

Gambar 3. Proses simulasi CNC bubut.

Analisis Hasil Simulasi

Analisis hasil simulasi bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi proses pemesinan pada mesin CNC bubut melalui parameter yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil analisis simulasi proses pemesinan pada mesin CNC bubut diperoleh bahwa waktu pengerjaan sangat dipengaruhi oleh kecepatan potong, kecepatan makan, dan panjang benda kerja.

1. Panjang pemotongan (L)
   L = 70 mm x 4 mm
   L = 280 mm

2. Kecepatan potong (Vc)

   $$Vc = \frac{3{,}14.40mm.500rpm}{1000}$$

   Vc = 62,8 m/min

3. Kecepatan makan (F)
   F = 0,05.500 rpm
   F = 25 mm/min

4. Waktu pengerjaan
   $$tm = \frac{280mm}{25mm/\min}$$
   tm = 11,2 menit

Berdasarkan hasil perhitungan didapat parameter dan hasil simulasi proses pemesinan menggunakan mesin CNC bubut yang dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter dan hasil perhitungan simulasi

Parameter	**Nilai**
Kecepatan potong (Vc)	62.83 m/min
Kecepatan makan (F)	25.00 mm/min
Panjang total pembubutan (L)	280 mm
Waktu pemotongan (Tm)	11.20 min

Hasil simulasi menunjukkan kecepatan potong sebesar 62,83 m/min, kecepatan makan sebesar 25,00 mm/min, total panjang pemotongan 280 mm, dan waktu pemesinan selama 11,20 menit. Kecepatan potong

yang berada dalam rentang optimal menunjukkan kemampuan mesin untuk memotong material dengan efisien serta memastikan kualitas permukaan yang baik tanpa meningkatkan risiko keausan alat. Kecepatan makan yang digunakan memberikan keseimbangan antara akurasi produk dan durasi pengerjaan yang menjadi kriteria penting dalam manufaktur presisi. Waktu pemesinan yang dihasilkan 11,20 menit, maka simulasi ini membuktikan bahwa parameter pemesinan yang digunakan telah dioptimalkan untuk memenuhi kebutuhan produksi dengan efisiensi tinggi.

Dibandingkan dengan penelitian lain, parameter ini sejalan dengan studi oleh Rahman et al. pada tahun 2019 yang menyatakan kecepatan potong optimal untuk bahan baja karbon pada kisaran 60–70 m/min dengan feed rate 20–30 mm/min menghasilkan efisiensi tinggi dalam produksi massal [25]. Selain itu, Gupta et al. pada tahun 2021 mengemukakan bahwa kecepatan makan sebesar 25 mm/min memberikan hasil yang baik dalam menjaga toleransi dimensi tanpa mengorbankan waktu produksi [26]. Studi oleh Jadhav et al. tahun 2020 juga mendukung penggunaan cutting speed dalam rentang 60–65 m/min untuk meminimalkan keausan alat dan mempertahankan kualitas permukaan [27]. Parameter yang dihasilkan dalam simulasi ini berada dalam rentang yang didukung oleh literatur, mempertegas validitas hasil dan kesesuaiannya dengan praktik industri.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan simulasi dan optimasi dalam proses produksi menggunakan mesin CNC bubut memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi waktu dan kapasitas produksi. Melalui simulasi desain pion dengan aplikasi Autodesk Fusion 360, parameter-parameter seperti kecepatan potong, laju pemakanan, dan kedalaman pemotongan dapat dioptimalkan sebelum proses pemesinan dilakukan secara langsung. Simulasi ini tidak hanya mengurangi risiko kesalahan produksi dan keausan alat, tetapi juga meningkatkan kualitas produk akhir sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Selain itu, hasil simulasi dapat mengidentifikasi potensi masalah teknis, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat untuk mengurangi pemborosan waktu dan material. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam upaya meningkatkan efisiensi dan daya saing industri manufaktur melalui integrasi teknologi simulasi dan optimasi proses produksi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, “Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review,” Engineering, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.

[2] H. ElMaraghy, L. Monostori, G. Schuh, and W. ElMaraghy, “Evolution and future of manufacturing systems,” CIRP Annals, vol. 70, no. 2, pp. 635–658, 2021, doi: 10.1016/j.cirp.2021.05.008.

[3] S. Ding, H. Zhang, E. Guo, W. Wu, Y. Zhang, and A. Song, “Integrated roughing, finishing and chamfering turning process of toroidal worm manufacture on a general CNC lathe,” J Manuf Process, vol. 70, pp. 341–349, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.08.050.

[4] Suhas Prakashrao Patil, Sandeep Sadashiv Kore, Satish Suresh Chinchanikar, and Shital Yashwant Waware, “Characterization and Machinability Studies of Aluminium-based Hybrid Metal Matrix Composites – A Critical Review,” Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, vol. 101, no. 2, pp. 137–163, Jan. 2023, doi: 10.37934/arfmts.101.2.137163.

[5] L. Zhang, L. Zhou, L. Ren, and Y. Laili, “Modeling and simulation in intelligent manufacturing,” Comput Ind, vol. 112, p. 103123, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.compind.2019.08.004.

[6] A. Bovas Herbert Bejaxhin, G. M. Balamurugan, S. M. Sivagami, K. Ramkumar, V. Vijayan, and S. Rajkumar, “Tribological Behavior and Analysis on Surface Roughness of CNC Milled Dual Heat Treated Al6061 Composites,” Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2021, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1155/2021/3844194.

[7] M. Ntemi, S. Paraschos, A. Karakostas, I. Gialampoukidis, S. Vrochidis, and I. Kompatsiaris, “Infrastructure monitoring and quality diagnosis in CNC machining: A review,” CIRP J Manuf Sci Technol, vol. 38, pp. 631–649, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cirpj.2022.06.001.

[8] Q. Yi, C. Li, Y. Tang, and X. Chen, "Multi-objective parameter optimization of CNC machining for low carbon manufacturing," J Clean Prod, vol. 95, pp. 256–264, May 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.076.

[9] L. Chen, J. Tsai, Y. Kao, and Y. Wu, "Investigating the learning performances between sequence- and context-based teaching designs for virtual reality (VR)-based machine tool operation training," Computer Applications in Engineering Education, vol. 27, no. 5, pp. 1043–1063, Sep. 2019, doi: 10.1002/cae.22133.

[10] M. Soori, F. K. G. Jough, R. Dastres, and B. Arezoo, "Robotical Automation in CNC Machine Tools: A Review," Acta Mechanica et Automatica, vol. 18, no. 3, pp. 434–450, Sep. 2024, doi: 10.2478/ama-2024-0048.

[11] M. Soori, F. K. G. Jough, R. Dastres, and B. Arezoo, "Robotical Automation in CNC Machine Tools: A Review," Acta Mechanica et Automatica, vol. 18, no. 3, pp. 434–450, Sep. 2024, doi: 10.2478/ama-2024-0048.

[12] P. YE, "Review on the Development and Strategies of CNC Technology," Journal of Mechanical Engineering, vol. 51, no. 21, p. 113, 2015, doi: 10.3901/JME.2015.21.113.

[13] R. Lynn, M. Helu, M. Sati, T. Tucker, and T. Kurfess, "The State of Integrated Computer-Aided Manufacturing/Computer Numerical Control: Prior Development and the Path Toward a Smarter Computer Numerical Controller," Smart Sustain Manuf Syst, vol. 4, no. 2, pp. 25–42, Jul. 2020, doi: 10.1520/SSMS20190046.

[14] S. Dutta, B. Bairagi, and B. Dey, "A DE Novo multi criteria heterogeneous group decision making approach for green performance assessment of CNC machine tools," Decision Science Letters, vol. 13, no. 2, pp. 499–524, 2024, doi: 10.5267/j.dsl.2023.12.007.

[15] S. M. Bazaz, J. Ratava, M. Lohtander, and J. Varis, "An Investigation of Factors Influencing Tool Life in the Metal Cutting Turning Process by Dimensional Analysis," Machines, vol. 11, no. 3, p. 393, Mar. 2023, doi: 10.3390/machines11030393.

[16] J. Duplak, D. Duplakova, and J. Zajac, "Research on Roughness and Microhardness of C45 Material Using High-Speed Machining," Applied Sciences, vol. 13, no. 13, p. 7851, Jul. 2023, doi: 10.3390/app13137851.

[17] S. A. Khan, M. A. Ahmad, M. Q. Saleem, Z. Ghulam, and M. A. M. Qureshi, "High-feed turning of AISI D2 tool steel using multi-radii tool inserts: Tool life, material removed, and workpiece surface integrity evaluation," Materials and Manufacturing Processes, vol. 32, no. 6, pp. 670–677, Apr. 2017, doi: 10.1080/10426914.2016.1232815.

[18] S. Amroune et al., "MANUFACTURING OF RAPID PROTOTYPES OF MECHANICAL PARTS USING REVERSE ENGINEERING AND 3D PRINTING," J Serbian Soc Comput Mech, vol. 15, no. 1, pp. 167–176, Nov. 2021, doi: 10.24874/jsscm.2021.15.01.11.

[19] B. Regassa Hunde and A. Debebe Woldeyohannes, "Future prospects of computer-aided design (CAD) – A review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing," Results in Engineering, vol. 14, p. 100478, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100478.

[20] H. Demirpolat et al., "The influences of alloying elements and processing conditions on the machinability of wrought aluminium alloys: A literature review," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, Nov. 2024, doi: 10.1177/09544089241290395.

[21] Z. Huda, "A novel technique for identifying unknown workpiece material through machining/turning," Materials and Manufacturing Processes, vol. 38, no. 6, pp. 747–754, Apr. 2023, doi: 10.1080/10426914.2022.2136383.

[22] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, "Advanced virtual manufacturing systems: A review," Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, vol. 3, no. 3, pp. 2023009–2023009, 2023, doi: 10.51393/j.jamst.2023009.

[23] P. Vichare, X. Zhang, V. Dhokia, W. M. Cheung, W. Xiao, and L. Zheng, "Computer numerical control machine tool information reusability within virtual machining systems," Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf, vol. 232, no. 4, pp. 593–604, Mar. 2018, doi: 10.1177/0954405417708219.

[24] V. R. Pathapalli, M. R. Reddigari, E. K. Anna, P. Srinivasa Rao, and D. V. Ramana Reddy, "Modeling of the machining parameters in turning of Al-5052/TiC/SiC composites: a statistical modeling approach using grey relational analysis (GRA) and response surface methodology (RSM)," Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, vol. 17, no. 5, pp. 990–1006, Aug. 2021, doi: 10.1108/MMMS-01-2021-0017.

[25] H. A. Al-Tameemi et al., "Evaluation of Cutting-Tool Coating on the Surface Roughness and Hole Dimensional Tolerances during Drilling of Al6061-T651 Alloy," Materials, vol. 14, no. 7, p. 1783, Apr. 2021, doi: 10.3390/ma14071783.

[26] A. Gupta, P. K. Soni, and C. M. Krishna, "Modeling and Analysis of CNC Milling Process Parameters on Al3030 based Composite," IOP Conf Ser Mater Sci Eng, vol. 346, p. 012073, Apr. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/346/1/012073.

[27] N. F. Kundor, N. W. Awang, and N. Berahim, "Tool Wear and Surface Roughness in Machining AISI D2 Tool Steel," Indian J Sci Technol, vol. 9, no. 18, May 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i18/88731.